

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Maršić

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Davor Zvizdić, dipl. ing.

Student:

Ivan Maršić

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i uz navedenu literaturu.

Zahvaljujem se voditelju rada prof. dr. sc. Davoru Zvizdiću na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se dipl. ing. Danijelu Šestanu na velikoj pomoći prilikom izvođenja praktičnog dijela završnog rada, savjetima i materijalima koje mi je ustupio.

Ivan Maršić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Maršić**

Mat. br.: 0035181633

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje temperaturnih gradijenata u mjeriteljskim pećima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Testing of temperature gradients in metrology furnaces**

Opis zadatka:

Za potrebe umjeravanja termoparova potrebno je ispitati radni prostor peći odnosno ispitati horizontalne i vertikalne gradijente te vremensku stabilnost temperature u radnom prostoru peći. Vremensku stabilnost potrebno je odrediti u periodu od 30 minuta u svim ispitnim točkama. Ispitivanje uključuje dvije peći:

- horizontalnu tunelsku peći Carbolite, model GZF12/75/910, $\Phi 75 \times 1090$ mm s keramičkim izotermalnim blokom, u temperaturnom području od 400 °C do 1050 °C i
- vertikalnu peć Isotech 465, dimenzije radnog volumena peći su $\Phi 90$ mm \times 550 mm a temperaturno područje od 200 °C do 1200 °C. Peć je potrebno ispitati s keramičkim izotermalnim blokom. Ova peć ima tri grijača s tri pripadna regulatora: glavni grijač te donji i gornji grijač. Potrebno je podesiti regulatore temperature gornjeg, glavnog i donjeg grijača tako da se postignu što je moguće manji vertikalni gradijenti unutar radnog volumena peći.

U radu je potrebno:

- Dati kratak opis peći sa skicama radnog prostora i shemama dijelova i elemenata regulacije.
- Opisati postupke za karakterizaciju zona kontrolirane temperature, što uključuje utvrđivanje horizontalnih i vertikalnih gradijenata, stalnosti i dinamike zagrijanja/hlađenja.
- Definirati i opisati ispitni postupak sa skicama mjernih linija.
- Sastaviti mjernu liniju za ispitivanje koristeći postojeće uređaje i pomoćnu opremu koja je na raspolaganju u FSB-LPM.
- Priložiti rezultate ispitivanja sa procijenjenim doprinosima zona ukupnoj mjernoj nesigurnosti usporedbenog umjeravanja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Davor Zvizdić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1.UVOD	1
2. ISPITIVANJE TERMOSTATIRANE PEĆI	2
3.ZONA UMJERAVANJA.....	4
4.KORIŠTENA OPREMA.....	6
4.1. TERMOSTATIRANA PEĆ	7
4.2.TERMOMETRI ZA UMJERAVANJE.....	11
4.3.TERMOMETRIJSKI OTPORNIČKI MOST.....	13
4.4.MJERAČ NAPONA(MULTIMETAR)	14
4.5.RAČUNALO.....	15
5.POSTUPAK ISPITIVANJA	16
5.1.UVJETI OKOLIŠA	16
5.2 STALNOST I HOMOGENOST TEMPERATURE U AKSIJALNOM SMJERU.....	17
6.REZULTATI.....	18
7.ZAKLJUČAK	24
LITERATURA.....	25
PRILOZI.....	26

POPIS SLIKA

SLIKA 1. TEMPERATURNI GRADIJENT	2
SLIKA 2. IZOTERMALNA ZONA (TLOCRT)	4
SLIKA 3. MJERNA LINIJA	6
SLIKA 4. TERMOSTATIRANA PEĆ ISOTECH 465	7
SLIKA 5. PRESJEK PEĆI	9
SLIKA 6. TEMPERATURNI REGULATOR PEĆI	10
SLIKA 7. TEMPERATURNI REGULATOR PEĆI UZ OZNAKE	10
SLIKA 8. KARAKTERISTIKE MATERIJALA TERMOMETRA	12
SLIKA 9. TERMOMETAR KORIŠTEN ZA MJERENJE TEMPERATURE PEĆI.....	12
SLIKA 10. SHEMATSKI PRIKAZ PLATINA OTPORNIČKOG TERMOMETRA	13
SLIKA 11. OTPORNIČKI MOST	14
SLIKA 12. DIGITALNI MULTIMETAR KEITHLEY-2001	14
SLIKA 13. PRIKAZ ODRŽAVANJA MJERENJA	18
SLIKA 14. PRIKAZ OBRADJE PODATAKA MJERENJA	18
SLIKA 15. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA POČETNOG MJERENJA	19
SLIKA 16. PODEŠAVANJE TEMPERATURE DONJEG KONTROLERA.....	20
SLIKA 17. GRAFIČKI PRIKAZ RAZLIKE GRADIJENTA IZMEĐU DVA MJERENJA.....	20
SLIKA 18. PRIKAZ SLOŽENOSTI MJERENJA PROMJENAMA TEMPERATURA GRIJAČA	21
SLIKA 19. KONAČNI PODACI TEMPERATURE GRIJAČA.....	22
SLIKA 20. KONAČNI VERTIKALNI GRADIJENTI	22
SLIKA 21. PRIKAZ SVIH VERTIKALNIH RADIJENATA U DIJAGRAMU	23

POPIS TABLICA

TABLICA 1. SPECIFIKACIJA PEĆI.....	8
TABLICA 2. SPECIFIKACIJE TERMOMETRA.....	12
TABLICA 3. SPECIFIKACIJA OTPORNIČKOG MOSTA	13
TABLICA 4. SPECIFIKACIJA MULTIMETRA.....	15

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
α	1/K	Temperaturni koeficijenti električnog otpora metala
\mathbf{n}_0	-	Jedinični vektor
R	Ω	Otpor
R_0	Ω	Otpor pri referentnoj temperaturi
T	K	Mjerena temperatura
T_0	K	Referentna temperatura
ΔT	K	Temperaturna razlika
U	V	Napon
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura

SAŽETAK

U sklopu ovog rada provedeno je ispitivanje aksijalnih gradijenata te stalnosti temperature unutar radnog volumena peći ISOTECH 465 (interna LPM oznaka TEPEC06), koja se koristi za umjeravanje termometara. Ispitivanje peći izvršeno je korištenjem dva umjerena termometra, prema internoj metodi Laboratorija. U sklopu izrade završnog rada opisani su postupci ispitivanja termostatirane peći te korištena oprema. Na osnovi rezultata mjerenja provedenih u laboratoriju, proračunata je krivulja gradijenta temperature sa ciljem da ta krivulja postane horizontalni pravac, odnosno da gradijenti na svakoj visini unutar peći postanu jednaki. U radu je također dan tablični i grafički prikaz rezultata provedenih ispitivanja. Na kraju rada su izneseni relevantni zaključci o rezultatima dobivenim ispitivanjem termostatirane peći.

Ključne riječi: termostatirana peć, aksijalni gradijent, homogenost temperature, stalnost

SUMMARY

This project is a case study about axial gradients in thermostatic furnace ISOTECH 465 (internal LPM mark TEPEC06), which is being used for calibration of thermometers.

Examination is performed with damp method of unstable temperature variations. Calibration of thermostatic bath, used equipment and research methods are through the thesis elaborated.

Based on the results of measurements made in the laboratory, calculated the curve gradient of temperature with the aim of this curve becomes a horizontal direction, or to gradients at any height within the furnaces become equal. The project has also given tabular and graphical representation of the results of tests. At the end of the study is presented the relevant conclusions on the results obtained by testing thermostatic furnace.

Key words: thermostatic furnace, axial gradients, temperature homogeneity, stability

1.UVOD

Tema završnog rada je ispitivanje karakteristika termostatisane peći ISOTECH 465 (interna oznaka TEPEC06), koja se koristi kao zona kontrolirane temperature za umjeravanje termometara. Ispitivanje se sastoji od utvrđivanja aksijalnog temperaturnog profila unutar radnog volumena peći te stalnosti temperature. Na temelju rezultata provedenih ispitivanja moguće je utvrditi karakteristike peći. Ispitivanje tunelske peći Carbolite, model GZF 12/75/910 nije napravljeno zbog nedostatka vremena za izradu zadatka.

Termostatisane peći koriste se za umjeravanje termometara, čime se određuje njihovo odstupanje od referentne temperature. Proizvođači peći daju podatke koji često nisu potpuni niti dovoljno precizni za potrebe kvalitetnog umjeravanja termometara. Iz ovog razloga umjerni laboratoriji provode vlastita ispitivanja, kako bi osigurali kvalitetu svojih usluga. Zanimljivo je kako niti jedan postupak ispitivanja nije standardiziran u svijetu pa svaki laboratorij koristi vlastitu metodu ispitivanja. Kada bi postojao opće prihvaćen postupak ispitivanja, korisnici bi tražene podatke o stalnosti i homogenosti peći mogli pronaći u katalozima. Neovisno o tome jesu li ovi podaci dostupni ili ne, tijekom eksploatacije može doći do kvara ili promjene karakteristika opreme pa je i to razlog zbog kojeg je potrebno provoditi periodička ispitivanja.

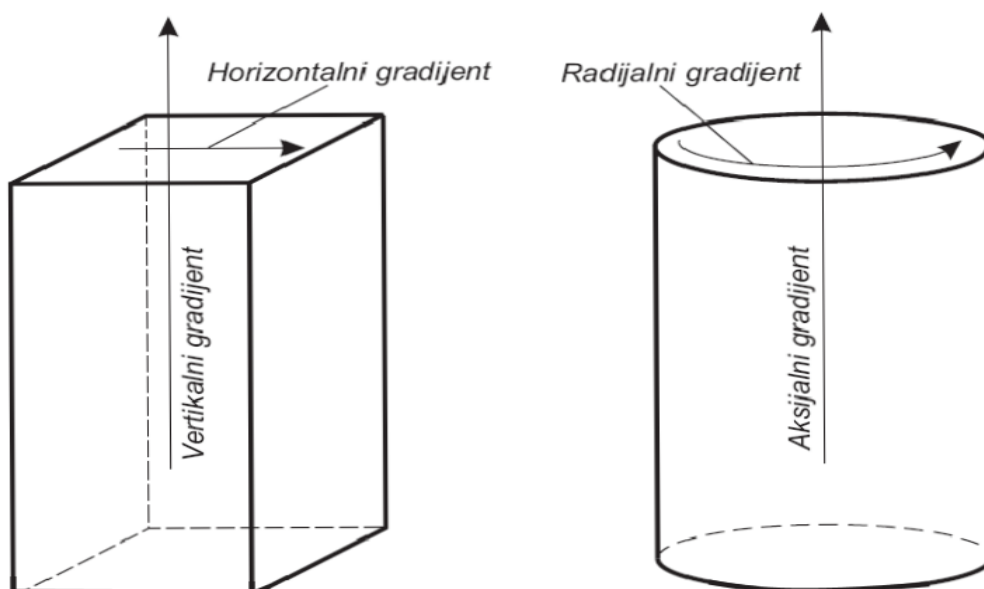
U ovom završnom radu korištena je metoda razvijena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u Laboratoriju za procesna mjerenja od strane prof. dr. sc. Davora Zvizdića i suradnika. Metoda se zasniva na ispitivanju s parom neumjerenih termometara.

2. ISPITIVANJE TERMOSTATIRANE PEĆI

Najvažnije značajke ispitivanja termostatske peći su stabilnost i homogenost temperature unutar njenog radnog volumena. Homogenost temperature ukazuje na kvalitetu termostatirane peći u vidu njene izolacije prema okolišu i preciznosti regulatora snage grijača peći.

Podaci o stalnosti i homogenosti temperature iz kataloga raznih proizvođača često nisu točno ili jednoznačno definirani, a mogu biti i precijenjeni, pa stoga laboratoriji za umjeravanja moraju provoditi svoja ispitivanja. Iako akreditirani laboratoriji za umjeravanja ispituju svoje kupke i peći pomoću vlastitih ispitnih postupaka, do sada niti jedan od tih postupaka nije jednoglasno prihvaćen kao standardni postupak za ispitivanje. Bilo bi korisno kada bi postojao međunarodno priznat i standardiziran postupak. Kada bi to bio slučaj, svatko bi mogao očitati tražene podatke o stalnosti i homogenosti kupke iz kataloga. To bi bilo od koristi kako za proizvođače, tako i za potrošače mjerne opreme.

Temperaturni gradijenti koji se proučavaju u termostatiranim kupkama i pećima, u metodama koje će se u ovom radu primijeniti su vertikalni i horizontalni gradijenti. Međutim, u slučajevima kada su termostatirane kupke ili peći cilindričnog oblika ili se ispitivanje vrši uz upotrebu cilindričnog izotermalnog bloka, mnogo je primjerenije govoriti o aksijalnim i radijalnim gradijentima.



Slika 1. Temperaturni gradijent

Temperaturni gradijenti koji se razmatraju u ovoj peći su radijalni i aksijalni, kao što je prikazano na slici 1, jer se radi o peći pravokutnog oblika uz upotrebu cilindričnog izotermalnog bloka. Temperaturni gradijent jest promjena temperature u smjeru normale na izotermalnu plohu te je on vektor s pozitivnim predznakom u smjeru povećanja temperature.

$$\text{grad } \vartheta = \vec{n}_0 \cdot \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta \vartheta}{\Delta n} = \vec{n}_0 \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial n}$$

gdje je : \vec{n}_0 – jedinični vektor

$\frac{\partial \vartheta}{\partial n}$ – skalarna veličina temperaturnog gradijenta izražena u K/m

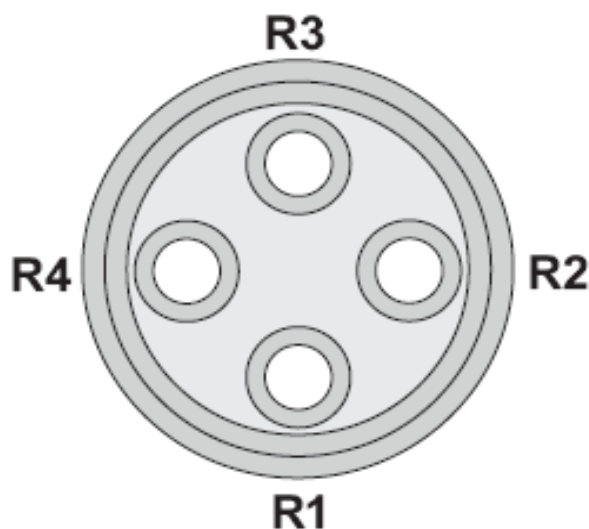
Treba napomenuti kako niti jedan postupak umjeravanja ne može zamijeniti iskusnog radnika u laboratoriju i iskustvo iz “prve ruke” u radu s određenim pećima i kupkama, te kako ne postoji idealan sistem umjeravanja koji bi bio potpuno vremenski stalan i bez temperaturnih gradijenata.

3.ZONA UMJERAVANJA

Glavna zadaća umjeravanja je otkrivanje mjernih instrumenata koji su nepouzdana odnosno koji svojim performansama ne zadovoljavaju određene kriterije. Za usporedbu rezultata potrebno je znati i zadovoljiti tolerancije u specifikacijama i normama te znati mjernu nesigurnost u očitavanju mjernog instrumenta. Mjerna nesigurnost je parametar koji se pridružuje mjernom rezultatu koji označuje rasipanje vrijednosti, što se smije pripisati mjernoj veličini. Mjerna nesigurnost govori o kvaliteti izvedbe mjerenja, govori nam o sumnji o bilo kojem dobivenom rezultatu u mjerenju. Mnogi uzroci mogu kompromitirati mjerenje, što govori da se mjerenja ne provode u idealnim uvjetima. Za sam postupak umjeravanja tablica korekcija ili jednadžba koja povezuje očitavanja instrumenta sa SI sustavom nije dovoljna. Za omogućavanje uspoređivanja rezultata kako bi se postigle tolerancije propisane specifikacijama ili normama potrebno je znati mjernu nesigurnost očitavanja instrumenata.

Zona umjeravanja je imaginarno prostorno područje unutar postojećeg (radnog) prostornog područja peći u kojem su smješteni standardni termometri i oni koje želimo umjeriti.

Peć za umjeravanje po pravilu ima izotermalni blok, tako da zona umjeravanja u tom slučaju obuhvaća blok i rupe u njemu.



Slika 2. Izotermalna zona (tlocrt)

Podaci o termostatiranom bloku:

Blok	
Materijal	Keramika + prah Al_2O_3
Promjer	58 mm
Visina	455 mm
Dubina rupa	445 mm
Ref. rupa	R1

Podaci o rupama bloka:

Rupe	
Rupa	Promjer
R1	9 mm
R2	9 mm
R3	9 mm
R4	9 mm

Blok je smješten u središte radnog volumena peći. Termometri su obloženi nastavkom od istog materijala kao i stjenke bloka i rupa u njemu (aluminij oksid). Termometri se zajedno sa nastavkom umeću u rupe bloka.

Koriste se dva slična termometra TEPOT22 i TETPS01. Termometar TETPS01 se postavi na referentnu poziciju, tj. rupu R1, a termometar TEPOT22 na neku drugu poziciju R3, po mogućnosti što bliže referentnoj, ali ne mora biti uvjet. Prvobitno oba termometra moraju biti uronjena do najniže točke mjerenja, tj. do dna rupe izotermalnog bloka (točka $h=0$).

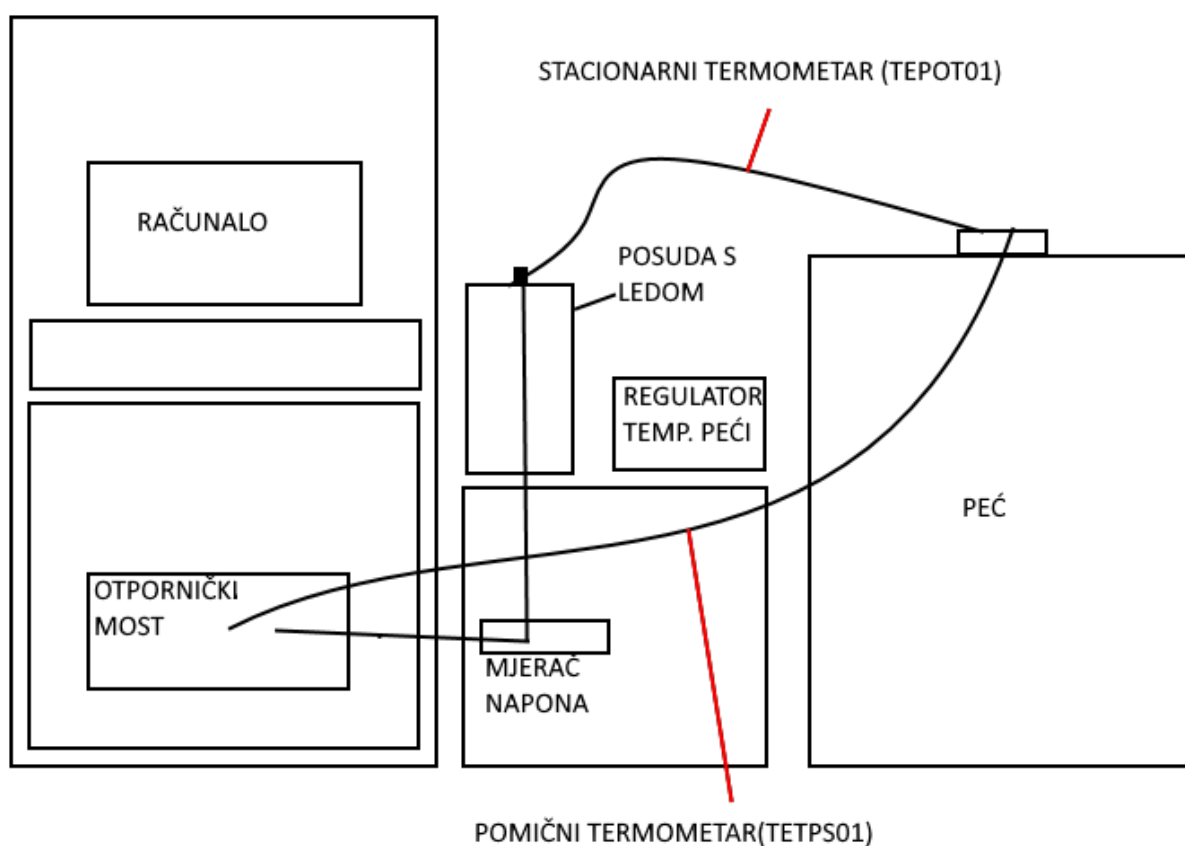
Nakon očitavanja temperature termometar TEPOT22 se vertikalno podiže do visine 400 mm od $h=0$ mm u koracima od 50 mm, i u minimalnom vremenskom intervalu 30 minuta, tj. dok se temperatura termometra ne ustali. Termometar TETPS01 ostaje na referentnoj poziciji u najnižoj točki mjerenja ($h=0$) tokom cijelog postupka. Na svakom od položaja se očitava pokazivanje obiju termometara te utvrdi razlika $T(R3, \text{TEPOT22}) - T(R1, \text{TETPS01})$. Razlike se prvo normaliziraju oduzimanjem početnog radijalnog gradijenta (R1-R3) kod $h=0$. Maksimalni aksijalni gradijent se određuje kao najveća razlika između svih utvrđenih normaliziranih razlika. Ako je to moguće treba koristiti ispitne otporničke termometre sa što manjom dužinom osjetnika ili termoparove. Sve testne temperature izračunate nesigurnosti proizašle iz aksijalnih temperaturnih gradijenata mogu biti rezimirane u tabličnom, ali i grafičkom obliku.

4.KORIŠTENA OPREMA

Oprema korištena u postupku ispitivanja sastavni je dio Laboratorija za Procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno na mjernoj liniji prikazanoj na slici 3.

Mjerenje se izvodi mjernim instrumentom. Svaki mjerni instrument se u pravilu sastoji od: osjetila, pretvornika i pokazivala. Osjetilo je tehnički element koji neposredno osjeća promjene u procesu i na svom izlazu daje odziv koji je analogan ulaznoj fizikalnoj veličini. Pretvornik je tehnički element koji izlaznu veličinu osjetila pretvara u analognu fizikalnu veličinu prikladnu za prijenos ili dovod na pokazivalo. Energija što je daje pretvornik obično je mehanička ili električna, iskazana kao standardizirani signal. Pokazivalo je tehnički element koji na neki način pokazuje vrijednost mjerene veličine.

U ovom mjerenju: osjetilo predstavlja termometar (otpornički termometar), pretvornik predstavlja otpornički most koji očitanu vrijednost termometra pretvara u digitalan zapis, pokazivalo predstavlja računalo koje izmjereni otpor preračunava u temperaturu te daje u pisanom obliku informaciju o izmjerenoj temperaturi te zapise trajno pohranjuje na tvrdi disk.



Slika 3. Mjerna linija

Pomični termometar je spojen direktno na otpornički most, a stacionarni termometar je uronjen na dno peći i spojen na mjerač napona Keithley 2001 i mali fiksni otpornik EOFIX06 preko kojeg je spojen na otpornički most. Na temelju očitavanja na otporničkom mostu i računalnog programa, rezultati mjerenja tj. očitane temperature i otpori izlistavaju se u računalu u excel-u.

4.1. TERMOSTATIRANA PEĆ

Ispitivanje je provedeno na kupki ISOTECH 465 (TEPEC06) koja je prikazana na slici 4. Peć je sastavni dio Laboratorija za mjerenje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Tehničke specifikacije kupke prikazane su tablicom 1.



Slika 4. Termostatirana peć ISOTECH 465

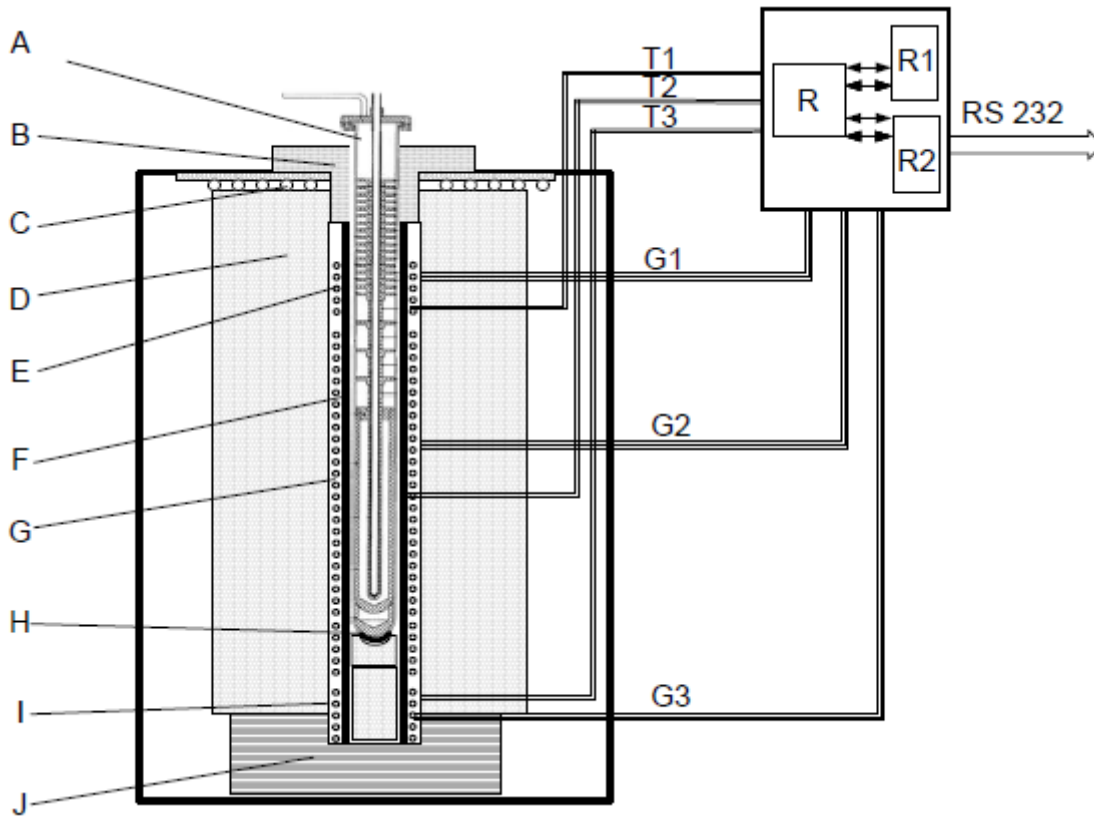
Tablica 1. Specifikacija peći

Proizvođač	Isotech
Model	465
Temperatura područja primjene	200°C – 1200°C
Regulator temperature	minimalni korak 0,1°C
Radni volumen	Promjer: 100 mm
	Dubina: 450 mm
Ukupne dimenzije	Visina: 960 mm
	Širina: 600 mm
	Dužina: 560 mm
Težina	115 kg
Snaga	3kW
Napajanje	110 ili 230 V
	50/60 Hz

Ova termostatirana peć nudi alternativu za one koji preferiraju tro zonske peći umjesto onih sa toplinskom cijevi, a može se koristiti za postizanje fiksne točke kositra, cinka, aluminija, srebra, zlata i bakra, ili sa keramičkim izotermalnim blokom za usporedbeno umjeravanje ili odžarivanje. Tri zone unutar ove peći stvaraju kontrolirani volumen konstantne temperature unutar kojeg se fiksne točke visoke temperature poput aluminija, srebra i bakra mogu topiti i skrućivati.

Velika je pažnja poklonjena uklanjanju upotrebe metala unutar radnog volumena peći i to iz razloga što visoko temperaturni termometri lako mogu biti kontaminirani metalnim parama. Sukladno tome, držač fiksne točke napravljen je od keramike, tj. aluminijevogoksida Al_2O_3 . Osim ćelija za postizanje fiksnih točaka također je moguća i upotreba keramičkog izotermalnog bloka, koji je izveden kao zatvorena cijev unutar koje se nalazi nekoliko manjih keramičkih cijevi (korištenih za smještaj umjeranih termometara) i prah aluminij oksid koji ovdje služi kao izotermalni medij. Temperaturni osjetnik glavnog regulatora temperature je termopar tip N, koji se pokazao stabilniji od R tipa. Uz ovaj tu su još dva dodatna regulatora koji kompenziraju bilo kakvo odstupanje od zadane temperature, a smješteni su jedan na dnu, a drugi na vrhu izotermalne zone. Ispod samog vrha peći nalaze se cijevi za rashladnu tekućinu, vodu iz vodovoda, sa priključcima za direktno spajanje. Ovo je potrebno kako bi pokrov peći ostao hladan i štitio umjeravane termometre, te kako bi se smanjilo toplinsko

opterećenje prema laboratoriju. Protok vode može varirati od 0,5 do 1 litre po minuti. Dobavna i odvodna cijev mogu biti obične vrtlarske cijevi za vodu. Rad peći bez hlađenja se ne preporuča kada su temperature iznad 700°C.

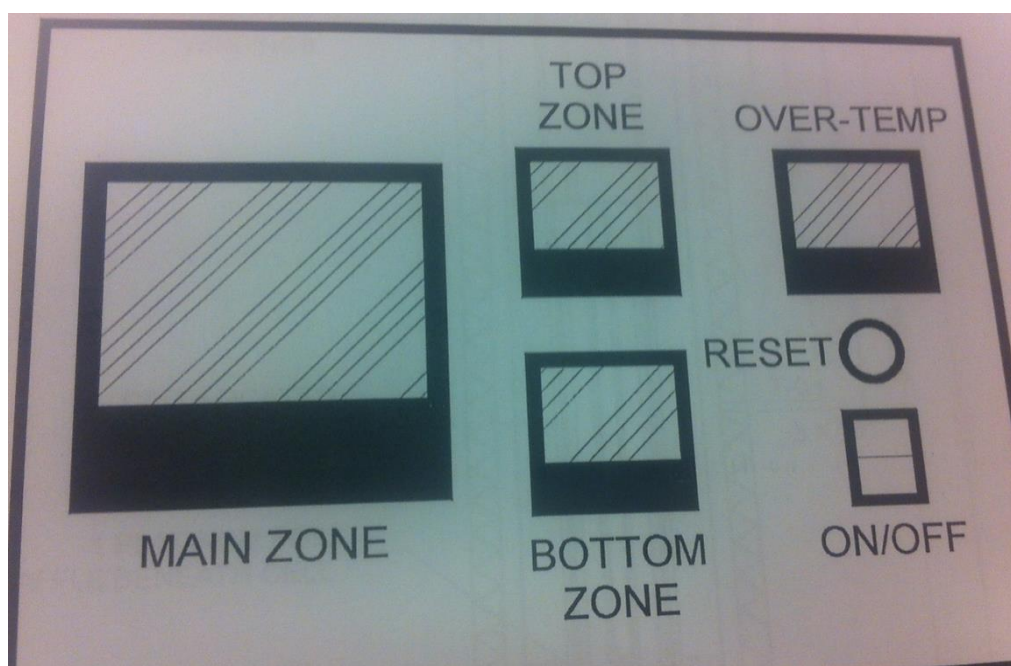


Slika 5. Presjek peći

Fiksna točka (A) održava se u okomitom položaju slojem izolacije (B) od prešanog aluminijskog oksida u peći. Gornja površina peći hladi se cijevima kroz koje struji voda (C), a unutrašnjost peći je izolirana slojem vate od aluminijskog oksida (D). Uniformnost temperature oko fiksne točke osigurava se glavnim grijačem (G), gornjim grijačem (E) i donjim grijačem (I), koji su od tijela fiksne točke odvojeni sa zaštitnom cijevi (F) izrađenom od bronce (do 660°C) ili od rekristaliziranog aluminijskog oksida (iznad 660°C). Ispod fiksne točke postavljena je platinska folija (H) koja sprječava lijepljenje kvarcne ovojnice fiksne točke za podlogu. Cijela peć se nalazi na temeljnoj ploči (J) izrađenoj od prešanog aluminijskog oksida. Termometri koji se nalaze u kućištima grijača (T1, T2, T3) spojeni su na temperaturne regulatore (R, R1, R2) na način da se željena temperatura u temperaturnom centru peći gdje je sredina ingota fiksne točke podesi na glavnom regulatoru (R), a regulatori gornjeg i donjeg grijača (R1, R2) spojeni su da osiguravaju razliku temperature prema glavnom regulatoru.



Slika 6. Temperaturni regulator peći



Slika 7. Temperaturni regulator peći uz oznake

4.2. TERMOMETRI ZA UMJERAVANJE

Za mjerenja temperature u postupku ispitivanja termostatisane peći korišteni su kontaktni termometri koji mjere temperaturu na osnovi promjene električnog otpora.

Otpornički pretvornici temperature kao osjetilo imaju metalni ili poluvodički otpornik. Kao najčešći materijali izrade otporničkih termometara koriste se: platina, nikal, bakar, te legure navedenih materijala, jer imaju približno linearnu promjenu otpora sa temperaturom, što je prikazano na slici 8. Kod ovih osjetnika promjena temperature manifestira se promjenom otpora osjetilnog elementa. Promjena električnog otpora može se smatrati mjerom temperature kojoj je otpornik izložen. Ovisnost otpora takva osjetila o prirastu temperature određuje se eksperimentom. Eksperimentalno dobivena ovisnost električnog otpora (R) o prirastu temperature (ΔT) opisuje se slijedećom jednadžbom:

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T + \beta (\Delta T)^2 + \gamma (\Delta T)^3 + \dots)$$

Za većinu metala ta se ovisnost može prikazati slijedećim izrazom:

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

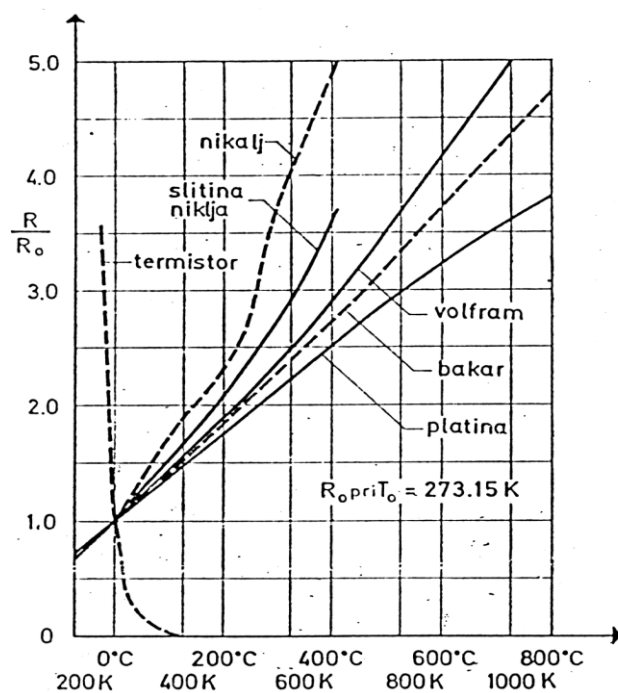
gdje je:

R_0 - otpor pri referentnoj temperaturi T_0

$$\Delta T = T - T_0$$

T - mjerena temperatura

α - temperaturni koeficijenti električnog otpora metala



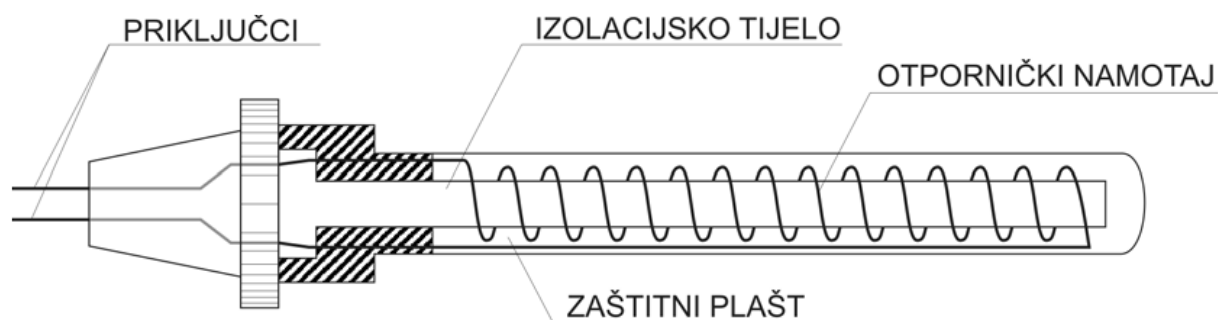
Slika 8. Karakteristike materijala termometra

Tablica 2. Specifikacije termometra

Proizvođač	Hart Scientific
Model	5628
Nominalni otpor osjetnika	25,5 Ω ($\pm 0.5 \Omega$)
Temperaturno područje	-200 °C do 661 °C
Točnost	6 mK do 22 mK (u području 0 °C do 661 °C)
Dimenzije	Ø6.35 mm x 508 mm, spojni vodovi 2 m



Slika 9. Termometar korišten za mjerenje temperature peći



Slika 10. Shematski prikaz platina otporničkog termometra

4.3. TERMOMETRIJSKI OTPORNIČKI MOST

Ohm-ov zakon kaže da se otpor može jednostavno izmjeriti mjerenjem napona i struje kroz otpornik. Ipak, električna struja se ne može lako izmjeriti osim u odnosu na napon i drugu poznanicu, otpor. U praksi, otpor se mjeri uspoređujući ga sa drugim otporom kako bi se eliminirala potreba za direktnim poznavanjem ili mjerenjem struje.

Tablica 3. Specifikacija otporničkog mosta

Proizvođač	Automatic System Laboratories (ASL)
Model	F18
Radno područje	Omjeri otpora od 0 do 1.3999999
Rezolucija	0.1 ppm
Točnost	± 0.1 ppm



Slika 11. Otpornički most

4.4. MJERAČ NAPONA (MULTIMETAR)

Multimetar je elektronički mjerni instrument kojim mjerimo različita elektronička svojstva.

Mogu mjeriti otpor, napon i struju.



Slika 12. Digitalni multimetar Keithley-2001

Tablica 4. Specifikacija multimetra

Mjerno područje	-200 ⁰ C do 1200 ⁰ C
	1 μ V - 20 V
Umjerna nesigurnost	1,57 μ V - 4,9 μ V

4.5. RAČUNALO

Računalni programi za akviziciju podataka - osnovna funkcija programa za akviziciju podataka je registracija, pohranjivanje, obrada, grafički prikaz i ispis izmjerenih podataka. Takav sustav omogućuje pravovremenu reakciju u slučaju da nešto pođe krivo jer računalo daje grafički i numerički zapis mjerenih veličina u realnom vremenu a samo praćenje postupka preko grafičkog zaslona nam omogućuje i lakše donošenje odluka za daljnji postupak mjerenja te ocjenu dali je prethodno mjerenje bilo valjano.

5. POSTUPAK ISPITIVANJA

Postupak ispitivanja je slijedeći:

- a) Od sobne temperature do prve točke testiranja: promatra se rast (ili pad) temperature (uz mogućnost bilježenja promjena) sve do ustaljenja temperature.
- b) U točki testiranja (kod postignute i ustaljene željene temperature): određuju se homogenost (prostorni gradijenti temperature) i stalnost.
- c) Prelazak na slijedeću temperaturu ispitivanja uz bilježenje promjena temperature sve do ponovnog postizanja stalne temperature itd.

Za svaku od temperatura, pri kojima je potrebno ispitati peć, najprije se provodi ispitivanje stalnosti a zatim aksijalna homogenost temperatura.

Rezultate ovih ispitivanja prikazuju se tablično i grafički pomoću dijagrama.

Prije početka samog postupka ispitivanja potrebno je zadovoljiti zadane uvjete okoliša u laboratoriju i provesti pripremu mjerenja.

5.1. UVJETI OKOLIŠA

Da bi postupak bio ispravan u laboratoriju moraju tijekom čitavog mjerenja biti zadovoljeni slijedeći uvjeti okoliša:

- a) Temperatura zraka mora biti između $+15^{\circ}\text{C}$ i $+35^{\circ}\text{C}$, s varijacijama manjim od $\pm 3^{\circ}\text{C}$ tijekom čitavog mjerenja.
- b) Relativna vlažnost tijekom mjerenja mora biti između 25% RH i 75% RH.

U svrhu pripreme za provedbu mjerenja, mjeritelj mora u okoliš termostatisirane peći postaviti uređaje za praćenje uvjeta okoliša i pričekati otprilike desetak minuta kako bi se uređaji stabilizirali. Ispitivanje se mora zaustaviti ako mjeritelj tijekom pregledavanja peći ustanovi da je nemoguće izvesti mjerenje. U slučaju ako se dogodi nešto zbog čega ispitivanje postaje opasno, također je potrebno zaustaviti mjerenje. Osim navedenih mjera opreza, potrebno je odrediti temperaturne točke ispitivanja prema dogovoru s naručiteljem, skicirati raspored prostornih točaka unutar peći u kojima se izvršava mjerenje te pripremiti termometre i ostalu opremu za rad.

5.2 STALNOST I HOMOGENOST TEMPERATURE U AKSIJALNOM SMJERU

Postupak ispitivanja stalnosti i homogenosti temperature u aksijalnom smjeru provode se s dva termometra uronjena na $h=0$ mm tj. na dno peći, postavljene u proizvoljno izabrane provrte. Jedan od termometara ostaje tijekom cijelog mjerenja u početnom položaju te ga nazivamo referentnim. Drugi termometar se podiže vertikalno prema gore u koracima od 50 mm, sve dok se ne podigne za 400 mm. Na svakom koraku (točki) mjerenja bilježe se temperature u periodu od minimalno 30 minuta.

6.REZULTATI

Rezultati mjerenja homogenosti temperature u aksijalnom smjeru te stalnosti temperature prikazani su u tabličnom obliku i grafički pomoću dijagrama.

Na početku mjerenja temperatura glavnog grijača peći bila je postavljena na 650⁰C, temperatura donjeg grijača na 570⁰C, a temperatura gornjeg grijača na 656⁰C.

U trenutku kada se peć ustabili na tim temperaturama, postavljen je referentni termometar na dno peći(h=0mm) , a pomični termometar na h=400mm od dna. Postupak održavanja mjerenja prikazan je na slici 13.

Datum	Vrijeme	Opis																			
ISPITIVANJE VERT. GRADIJENATA, 650 °C																					
15.12.2015.	do 11:27	umjeravanje malog fiksnog otpornika SN:009473/02																			
	11:27	početak ispitivanja vert. Gradijenata, TEPOT22+EOFIX009473/02+F18-LPM, termometar na vert. Poziciji 400 mm od dna keram. Bloka																			
		TETPS01 postavljen je na dno keram. Bloka, napon: Kiethly 2001, Tref=termos posuda s ledom (ne mjerimo temp. Leda)																			
	13:14:18	TEPOT22 spušten na 350 mm od dna												350 mm							
	14:48:19	TEPOT22 spušten na 300 mm od dna												300 mm							
16.12.2015.	9:35	TEPOT22 spušten na 250 mm od dna												250 mm							
	10:46:39	TEPOT22 spušten na 200 mm od dna												200 mm							
	12:53	TEPOT22 spušten na 150 mm od dna												150 mm							
	14:17	TEPOT22 spušten na 100 mm od dna												100 mm							
	15:04	TEPOT22 spuštena na 50 mm od dna												50 mm							
	15:36	TEPOT22 na dnu												0 mm							

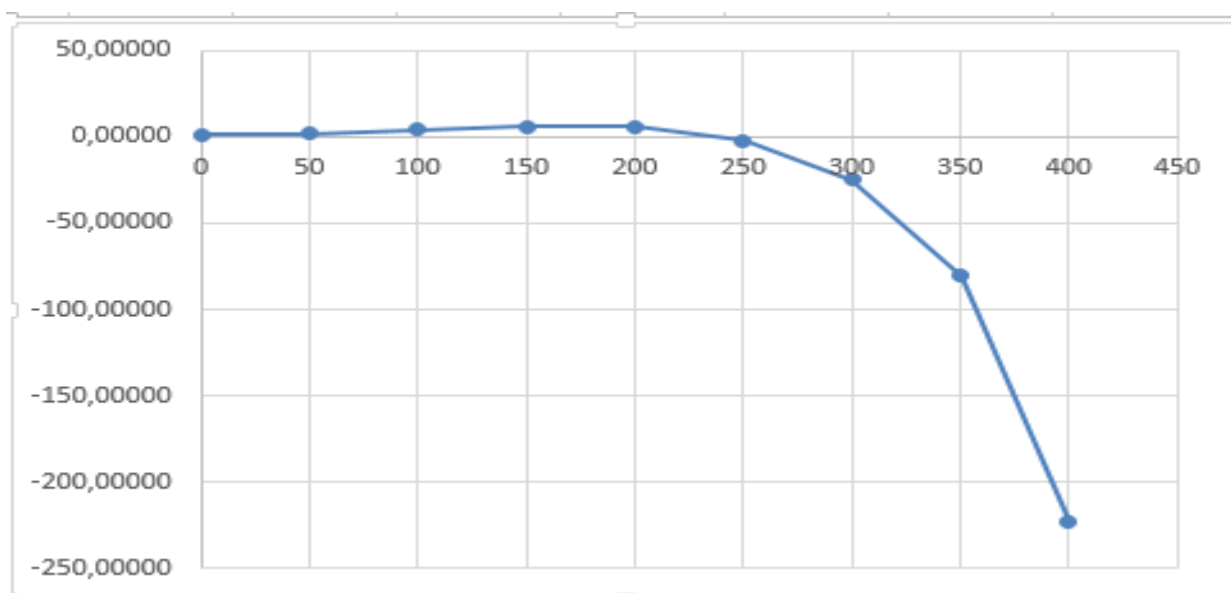
Slika 13. Prikaz održavanja mjerenja

Nakon završetka mjerenja slijedi obrada podataka, koja je prikazana na slici 11.

date	start	end	avg, 10 min	uct	n		stacionaran termometar			h		razlika temperatura
15.12.2015.	12:58:58	13:08:58	419,913137	15,5	31		642,3676	2,2	150	400		-222,45442
15.12.2015.	14:16:18	14:26:18	561,738055	0,6	31		642,2348	2,3	150	350		-80,49678
16.12.2015.	8:28:39	8:38:39	617,121776	0,34	31		642,064	1,8	150	300		-24,94221
16.12.2015.	10:22:59	10:32:59	640,011853	1,0	31		642,1906	2,8	150	250		-2,17877
16.12.2015.	12:24:39	12:34:39	648,394717	1,2	31		642,407	2,8	150	200		5,98773
16.12.2015.	13:52:39	14:02:39	648,360535	1,2	31		642,2746	3,3	150	150		6,08595
16.12.2015.	14:48:19	14:58:19	646,043028	0,6	31		642,2389	3,4	151	100		3,80414
16.12.2015.	15:22:19	15:32:19	644,071107	1,9	31		642,3018	3,1	151	50		1,76930
17.12.2015.	12:12:45	12:22:45	642,975027	0,8	31		642,0451	3,0	151	0		0,92988

Slika 14.Prikaz obrade podataka mjerenja

Podaci se prebacuju i u grafički oblik prema slici 12.



Slika 15. Grafički prikaz rezultata početnog mjerenja

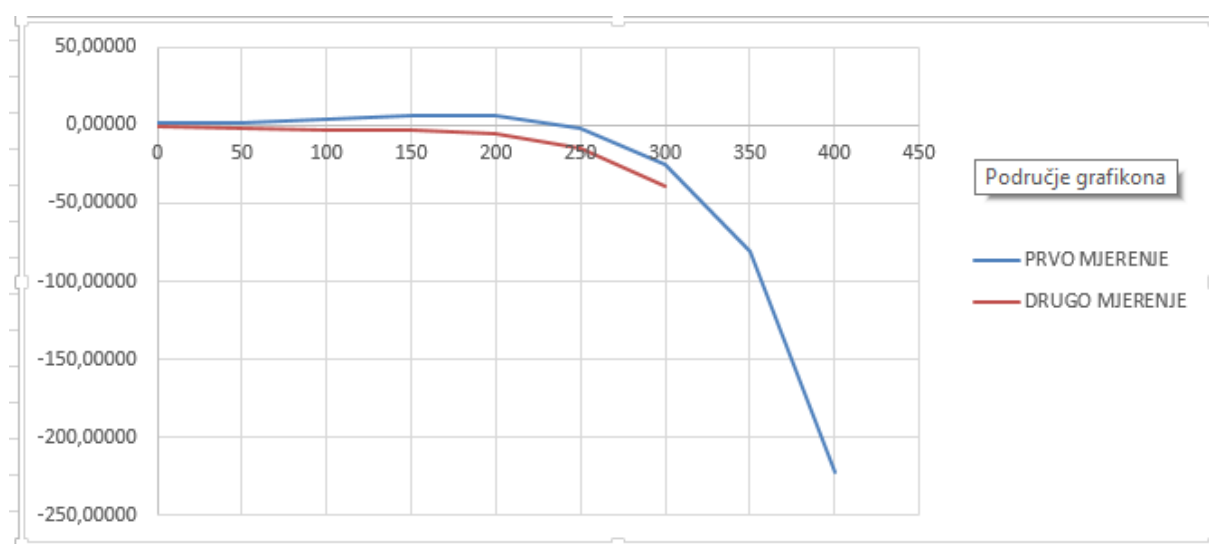
S obzirom da je cilj ovih mjerenja postaviti temperature grijača peći na takve vrijednosti na kojima će vertikalni gradijenti temperature za svaku visini postići slične vrijednosti, iz gornjeg grafa vidljivo je kako na visinama 350 i 400 mm je preveliki utjecaj okoliša, tj. preveliki su gubici topline. Za iduća mjerenja odlučeno je da se te visine izbacuju iz proračuna jer za njih nije moguće postići cilj ovih mjerenja.

Također sada je jasno da će vertikalni gradijenti ponajviše ovisiti o temperaturi donjeg grijača pošto područje djelovanja gornjeg grijača ima veliki utjecaj okoliša. S obzirom na to posvetio sam se donjem grijaču jer on ima najveći utjecaj, a tek kada njega dovedem u red onda ću se posvetiti gornjem grijaču, koji ipak ima manji utjecaj na temperature u peći.

Tako slijedi prilagodba temperature donjeg grijača do barem približnih potrebnih vrijednosti prema slici 16.

	12:48	SP donjeg kontrolera peći promijenjen s -80 °C na -75 °C		-80	-75
	12:55	TEPOT22 podignut na 200 mm od dna	200 mm		
	14:13	TEPOT22 na dnu	0 mm		
	14:42	SP donjeg kontrolera peći promijenjen s -75 °C na -65 °C		-75	-65
	15:41	TEPOT22 podignut na 200 mm od dna	200 mm		
	15:46	SP donjeg kontrolera peći promijenjen s -65 °C na -50 °C		-65	-50
23.12.2015.	8:44	TEPOT22 na dnu	0 mm		
	9:15	SP donjeg kontrolera peći promijenjen s -50 °C na -48.5 °C		-50	-48,5
	11:04	TEPOT22 podignut na 200 mm od dna	200 mm		
	11:20	zamijenjen led u termosici za TETPS01			
	11:28	TEPOT22 spušten na 150 mm od dna	150 mm		
	14:00	TEPOT22 spušten na 100 mm od dna	100 mm		
	15:21	TEPOT22 spušten na 50 mm od dna	50 mm		
	20:17	TEPOT22 na dnu	0 mm		

Slika 16. Podešavanje temperature donjeg kontrolera



Slika 17. Grafički prikaz razlike gradijenta između dva mjerenja

S mijenjanjem temperature donjeg grijača se postiglo smanjenje temperaturnih gradijenata, ali i dalje nije ni blizu želji da se postigne horizontalni pravac. Shvatio sam da će ovo biti dugotrajan postupak mjerenja, pogotovo jer je potrebno par sati da se peć počne ponašati stabilno promjenom temperature grijača, a za svaku visinu je potrebno cca. sat vremena da se temperatura na pomičnom termometru počne ponašati stabilno.

Nastavak mjerenja je protekao u mijenjaju temperature gornjeg i donjeg termometra, jer kada promijenim temperaturu gornjeg grijača, više se promjeni temperatura u višim točkama, pa ih onda promjena temperature donjeg grijača opet poremeti. Tako da je sve to postala jedna igra, što prikazuje slika 18.

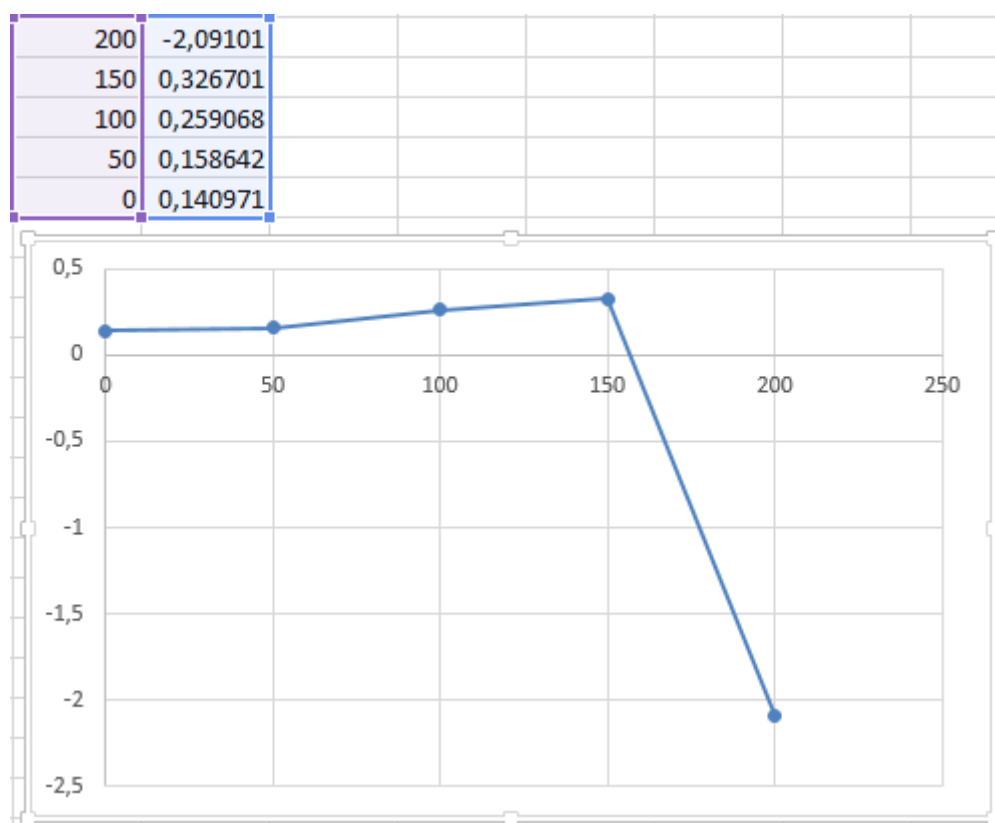
13.1.2016.	11:08	SP donjeg kontrolera peći promijenjen s -55 °C na -65.5 °C		
	12:20	TEPOT22 spušten na 150 mm od dna	150	mm
	12:40	TEPOT22 spušten na 100 mm od dna	100	mm
	13:22	TEPOT22 spušten na 50 mm od dna	50	mm
	14:03	TEPOT22 na dnu	0	mm
14.1.2016.	13:10	SP gornjeg kontrolera peći promijenjen s -4 °C na +1°C		
	14:35	TEPOT22 spušten na 300 mm od dna	300	mm
	15:01	TEPOT22 spušten na 250 mm od dna	250	mm
	15:58	TEPOT22 spušten na 200 mm od dna	200	mm
	16:35	TEPOT22 spušten na 150 mm od dna	150	mm
	17:13	TEPOT22 spušten na 100 mm od dna	100	mm
	17:51	TEPOT22 spušten na 50 mm od dna	50	mm
	18:30	TEPOT22 na dnu	0	mm
15.1.2016	12:20	SP gornjeg kontrolera peći promijenjen s +1 °C na -5.7°C		
	12:52	TEPOT22 na dnu	0	mm
	13:14	TEPOT22 dignut na 50 mm od dna	50	mm
	13:46	TEPOT22 dignut na 100 mm od dna	100	mm
	14:20	TEPOT22 dignut na 150 mm od dna	150	mm
	15:03	TEPOT22 dignut na 200 mm od dna	200	mm
	16:23	TEPOT22 dignut na 250 mm od dna	250	mm
18.1.	10:42	SP gornjeg kontrolera peći promijenjen s -5.7 °C na -6.9°C		
	12:15	TEPOT22 spušten na 200 mm od dna	200	mm
	13:00	TEPOT22 spušten na 150 mm od dna	150	mm
	14:03	TEPOT22 spušten na 100 mm od dna	100	mm
	14:59	TEPOT22 spušten na 50 mm od dna	50	mm
	15:51	TEPOT22 na dnu	0	mm
	17:08	SP gornjeg kontrolera peći promijenjen s -6,9 °C na -6.4°C		
19.1.	6:40	TEPOT22 na dnu	0	mm
	7:40	TEPOT22 dignut na 50 mm od dna	50	mm
	9:00	TEPOT22 dignut na 100 mm od dna	100	mm
	9:35	TEPOT22 dignut na 150 mm od dna	150	mm
	10:05	TEPOT22 dignut na 200 mm od dna	200	mm
	17:00	SP gornjeg kontrolera peći promijenjen s -6,4 °C na -7.7°C		
	17:00	SP donjeg kontrolera peći promijenjen s -65,5 °C na -69.1°C		
20.1.	10:03	TEPOT22 na 200 mm od dna	200	mm
	10:48	TEPOT22 na 150 mm od dna	150	mm
	11:26	TEPOT22 na 100 mm od dna	100	mm
	12:01	TEPOT22 na 50 mm od dna	50	mm
	12:40	TEPOT22 na dnu	0	mm

Slika 18. Prikaz složenosti mjerenja promjenama temperatura grijača

Sa što većim brojem mjerenja dolazi se do sve boljih podataka, te na kraju u dogovoru sa asistentom ostajemo pri vrijednostima sa slike 19. kao vrijednostima koji su dovoljne dobre za prihvatiti ih kao rezultate i kraj mjerenja.

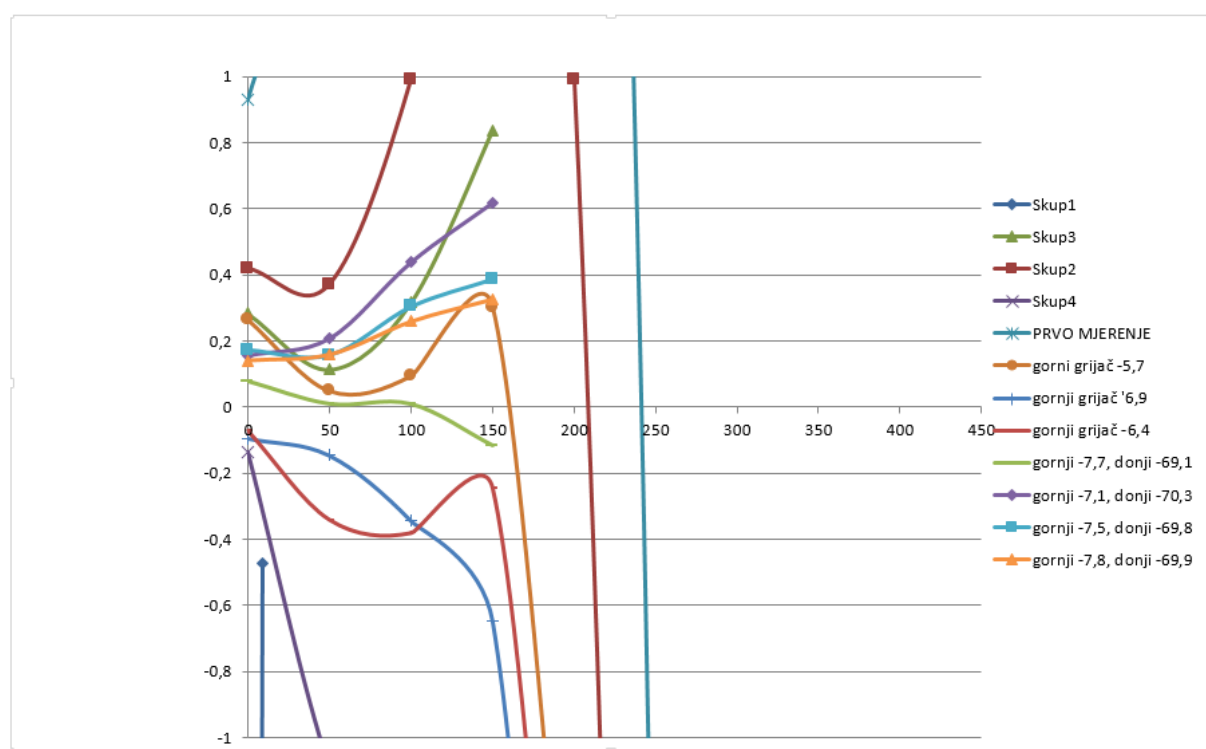
22.1.	11:40	SP donjeg kontrolera peći promijenjen s -69.8 °C na -69.9°C			
	11:40	SP gornjeg kontrolera peći promijenjen s -7.5 °C na -7.8°C			
	12:30	TEPOT22 na 200 mm od dna		200	mm
	13:20	TEPOT22 na 150 mm od dna		150	mm
	13:52	TEPOT22 na 100 mm od dna		100	mm
	14:32	TEPOT22 na 50 mm od dna		50	mm
	14:56	TEPOT22 na dnu		0	mm
	15:40	kraj mjerenja			

Slika 19. Konačni podaci temperature grijača



Slika 20. Konačni vertikalni gradijenti

Iz slike 20. se vidi da se nisu postigli odgovarajući rezultati za visine preko 150 mm, ali zato sve ispod toga se dovelo na zadovoljavajuću razinu.



Slika 21. Prikaz svih vertikalnih radijenata u dijagramu

Slika 21. prikazuje sva mjerenja napravljena za ovu peć, pokazuje razlike vertikalnih temperaturnih gradijenata u ovisnosti o visini. Ovakvi dijagrami su mi najviše pomagali da vidim gdje je smješteno trenutno mjerenje, koliko odstupa od prošlog i što napraviti dalje, tj. kako riješiti problem da dođem do još boljih rezultata.

7.ZAKLJUČAK

Nakon provedenih mjerenja te analize prikupljenih podataka dobiveni su rezultati na temelju kojih se zaključuje da je mjerenje uspješno obavljeno jer su postignuti zadovoljavajuće vrijednosti aksijalnih gradijenata. To znači da se peć pri ovim temperaturama na grijačima može koristiti kao pouzdana zona kontrolirane temperature za ispitivanje i umjeravanje termometara u temperaturnom području u kojem je ispitan.

LITERATURA

[1] Nikola Radman, Ispitivanje karakteristika zona kontrolirane temperature, diplomski rad, FSB, Zagreb 2010.

[2] Tomislav Veliki, Razvoj primarnog etalona temperature s novom metodom prenošenja sljedljivosti, doktorski rad, FSB, Zagreb, 2011.

[3] Antun Jugović, Ispitivanje kupke za umjeravanje termometara, završni rad, FSB, Zagreb, 2015.

[4] Davor Zvizdić, Interne podloge za predavanja Mjerenja u termotehnici i procesnoj tehnici, FSB

PRILOZI

I. CD-R disc